

## APIS, radar pasivo en el JIP-ICET

Pilar Jarabo, Manuel Rosa, David de la Mata, J.Luis Bárcena, Nerea del Rey, UAH; Javier Álvarez, Javier Gaitán, INDRA Sistemas

Palabras clave: radar pasivo, multiestático, ISAR, Doppler, CFAR, Space Adaptive Processing

Metas tecnológicas relacionadas: MT 2.2.1.

El proyecto APIS (*Array Passive ISAR adaptive processing*) nació con el objetivo de dar una primera respuesta a la posibilidad de utilizar sistemas radar pasivos en aplicaciones de seguridad y defensa. Estos sistemas utilizan transmisores no cooperativos (iluminadores de oportunidad), en lugar de un transmisor dedicado, característica que les hace muy atractivos por su baja probabilidad de interceptación, menores costes de desarrollo y mantenimiento e instalación no sometida a legislación sobre emisiones electromagnéticas. Estas características, junto con la paulatina erosión que están sufriendo las bandas radar ante el avance de los sistemas de comunicación, los convierte en unos valiosos aliados de los radares activos en aplicaciones de vigilancia.

La característica principal del sistema APIS es la integración de múltiples funcionalidades en una única plataforma: concepto de radar pasivo, utilización de un *array* de antenas, incorporación de técnicas adaptativas de procesamiento espacial (*Space Adaptive Processing*) y la posibilidad de generar imágenes ISAR (*Inverse Synthetic Aperture Radar*) de los blancos detectados con propósitos de clasificación. El proyecto se ha desarrollado en el marco del Programa JIP ICET de inversión conjunta en I+D de Defensa de la EDA (*European Defence Agency*) sobre "conceptos innovadores y tecnologías emergentes", del que el Ministerio de Defensa de España es miembro contribuyente.

El consorcio APIS ha estado constituido por seis entidades de cuatro países: INDRA (líder) y la Universidad de Alcalá por parte de España, el Consorcio Nacional Interuniversitario de Telecomunicaciones y la empresa VITROCISSET SPA por parte de Italia, el Instituto de Investigación en Áreas de Computación y Automatización de Hungría y la Universidad de Chipre.

El proyecto ha abarcado todo el proceso de diseño y desarrollo del sistema, culminando con la construcción y validación en un escenario real de un demostrador. Se ha realizado un profundo estudio teórico que ha permitido la definición de los requisitos de diseño del sistema, desde los elementos radiantes del *array* hasta los algoritmos de procesamiento digital en *array* responsables de la detección, seguimiento y formación de las imágenes ISAR. Todos los algoritmos han sido validados mediante simulaciones de escenarios radar y, finalmente, en el demostrador desarrollado.

El proyecto APIS ha demostrado que un sistema radar pasivo basado en un *array* de antenas es capaz de detectar y seguir blancos aéreos y terrestres en escenarios urbanos complejos y que es posible la generación de imágenes radar de blancos con propósitos de clasificación, utilizando señales de comunicaciones digitales disponibles en el entorno y sin necesidad de un transmisor dedicado.

En las secciones siguientes se presenta una breve descripción del principio de funcionamiento de los radares pasivos, para dar paso a una descripción del proyecto APIS, del demostrador desarrollado y a la presentación de resultados obtenidos en el emplazamiento en el que actualmente se encuentra.

### Radares pasivos

Los radares pasivos (*Passive Bistatic Radar*, PBR) utilizan señales radiadas por sistemas de comunicación, radio-navegación u otros radares activos en lugar de un transmisor propio [1]. Son, por tanto, sistemas multiestáticos, cuyo objetivo es detectar blancos y estimar parámetros como la posición o la velocidad, a partir de la energía que dispersan cuando son iluminados por un iluminador de oportunidad disponible en el entorno. En la figura 1 se

muestra la geometría básica de un radar pasivo biestático: RT es la distancia entre el iluminador y el blanco, RR es la distancia entre el receptor pasivo y el blanco y L es la longitud de la línea base. sB representa la sección radar biestática del blanco, que modela la cantidad de potencia que este refleja hacia el receptor radar. Dado que no se ejerce ningún control sobre la señal transmitida por el iluminador de oportunidad, el sistema dispone de dos canales:

- Canal de referencia, con la misión de capturar la señal transmitida por el iluminador de oportunidad y generar así la señal de referencia para el procesamiento coherente de los ecos de los blancos.
- Canal de vigilancia, encargado de capturar los ecos producidos por los blancos al ser iluminados por el iluminador de oportunidad.

En el receptor, las señales adquiridas por el canal de vigilancia se correlacionan con copias de la señal de referencia desplazadas en doppler para generar las funciones de ambigüedad cruzadas (CAF, *Cross Ambiguity Functions*) o mapas rango-doppler, que permitirán detectar el blanco y estimar su retardo y desplazamiento doppler respecto a la señal de referencia. En la figura 2, se muestra un esquema de generación del mapa rango-doppler. Como resultado, se obtendrán máximos en los puntos correspondientes al retardo y desplazamiento doppler del blanco respecto al iluminador. A partir de la geometría del sistema y las características de radiación de la antena receptora, será posible estimar la posición del blanco y su velocidad radial.

En la figura 2 también se muestra el mapa rango-doppler resultado de correlar consigo misma la señal de referencia (un canal de televisión digital terrestre, TDT). Esta señal es varios



Fig. 1. Geometría de un radar pasivo biestático.

órdenes de magnitud superior a los ecos esperables de los blancos, por lo que, aunque la antena receptora no apunte al iluminador, la señal de referencia que es adquirida por el canal de vigilancia (el llamado DPI, *Direct Path Interference*) será significativamente superior al eco del blanco y, además, correlatará perfectamente con la referencia adquirida por el canal de referencia. Junto con el esperado máximo en el origen, aparece toda una estructura en la CAF que depende de las características de la señal transmitida, la cual no ha sido diseñada para aplicaciones radar. En la figura 2 se muestran los picos de ambigüedad asociados a la señal de TDT, resultado de componentes deterministas introducidas por los transmisores para la correcta sincronización y decodificación de la señal en los receptores TDT. Estos picos pueden confundirse con blancos o enmascarar blancos existentes. Este fenómeno debido al DPI requiere del diseño de etapas de procesamiento capaces de reducir (idealmente eliminar) la señal de referencia de los canales de vigilancia antes de realizar la correlación cruzada.

En la figura 3 se presenta la estructura básica de un radar pasivo:

- Sistema de recepción. La solución más extendida utiliza diferentes sistemas de antenas para los canales de referencia y vigilancia. En los primeros, el sistema de antenas debe rechazar señales emitidas por otros iluminadores de oportunidad de características similares a las del elegido y que estén presentes en el escenario. En los canales de vigilancia, las señales a rechazar son las emitidas por los iluminadores de oportunidad, tanto el elegido con propósitos de detección como otros interferentes. La utilización de agrupaciones (*arrays*) de antenas permite

la aplicación de técnicas de filtrado espacial para la generación de haces en las direcciones de interés, nulos en las direcciones de los iluminadores de oportunidad considerados como interferentes y el clutter (ecos radar generados por objetos que, al igual que los blancos, están en el volumen de cobertura del sistema pero que no se desean detectar).

- Preprocesado de los canales de referencia y vigilancia, con los objetivos principales de reducir el DPI en los canales de vigilancia, el multitrajecto, el clutter y los picos de ambigüedad generados en los mapas rango-doppler debido a la estructura de la señal de oportunidad (TDT en la figura 2).
- Función de ambigüedad cruzada. Siguiendo el esquema indicado en la figura 2, se implementa el filtro adaptado que maximiza la relación señal a ruido en los puntos del mapa rango-doppler correspondientes a la posición y velocidad radial del blanco.
- Etapa de detección: la salida del filtro adaptado (CAF) se aplica al detector que en su etapa final compara su salida con un umbral con el fin de decidir sobre la presencia o ausencia de blanco, cumpliendo unos requisitos de probabilidad de detección y falsa alarma. Los detectores CFAR (*Constant False Alarm Rate*) son los más extendidos.

### Radars activos versus radares pasivos

Entre otras, las principales ventajas de los sistemas pasivos respecto a los activos son las que se enumeran a continuación:

- Menor coste, debido a la ausencia de transmisor dedicado.
- Menor vulnerabilidad frente a contramedidas electrónicas (ECM)

causada por el funcionamiento “silencioso” de estos sistemas.

- Pueden presentar una mayor capacidad de detección ante blancos de baja probabilidad de interceptación, debida a que estos blancos han sido diseñados para presentar una baja RCS ante sistemas monoestáticos y frecuencias radar, diferentes de las utilizadas por sistemas de comunicación.

Pero también presentan algunos inconvenientes, como:

- Un incremento en la complejidad del receptor, al tener que utilizar transmisores no controlados y señales no diseñadas con propósitos de detección.
- Total dependencia respecto a la disponibilidad de iluminadores de oportunidad.
- La resolución en distancia depende de la geometría del sistema, al ser función del ángulo biestático (figura 1).
- Las coberturas suelen ser menores que las de los sistemas activos.

### Análisis de potenciales iluminadores de oportunidad

El hecho de que los sistemas pasivos utilicen de forma oportunista señales no diseñadas de forma específica con propósitos de detección, hace necesaria la realización de estudios de potenciales iluminadores de oportunidad, para determinar su viabilidad en aplicaciones radar. La función de ambigüedad es una herramienta que permite determinar las capacidades detectoras de las señales. Se ha aplicado para el estudio de señales de comunicación analógicas como la radiodifusión FM [2,3] o la televisión analógica [4], concluyendo que sus reducidos anchos de banda y su

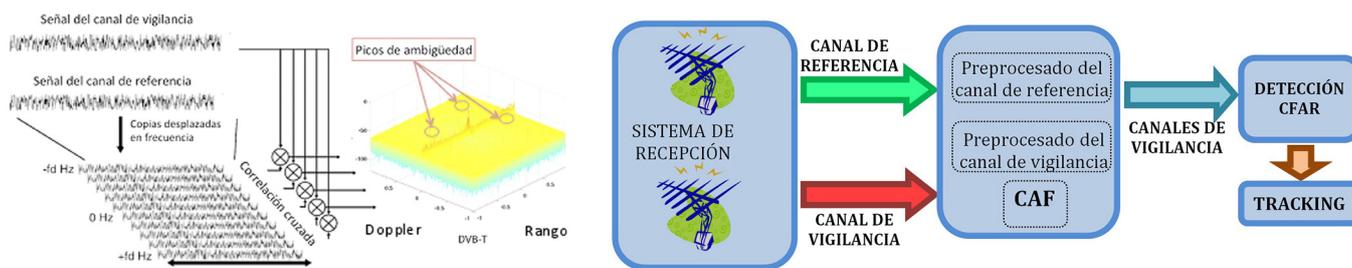


Fig. 2. Esquema básico de generación del mapa rango-doppler (izda.); función de ambigüedad de la señal de referencia adquirida de un transmisor de televisión digital terrestre consigo misma, en el que además del máximo esperable para un retardo y un doppler nulos, aparecen otros máximos asociados a componentes deterministas de la señal y no a la presencia de blancos en el escenario radar (centro). Fig. 3 (derecha). Arquitectura básica de un sistema radar pasivo.

dependencia respecto del contenido de la señal transmitida son serios inconvenientes en aplicaciones radar. Los mayores anchos de banda de las señales de comunicación digitales y su independencia respecto del contenido han despertado un creciente interés en su utilización como señales de oportunidad. Se han realizado estudios de viabilidad de las señales DAB (*Digital Audio Broadcasting*), GSM (*Global System for Mobile*), UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) y DVB (*Digital Video Broadcasting*) o TDT [5-8]. De entre todas ellas, se ha elegido la señal de TDT para el diseño del demostrador APIS, debido a las elevadas potencias transmitidas, disponibilidad de transmisores y ancho de banda (el ancho de banda de un canal TDT es de 8 MHz, que puede incrementarse mediante la utilización de canales consecutivos).

### El proyecto APIS

El proyecto APIS, tiene como objetivo general el estudio y la implementación de una prueba de concepto de un radar pasivo, multicanal y multiestático, haciendo uso de técnicas de procesamiento en array y señales de oportunidad digitales, con el propósito de detectar blancos y generar imágenes ISAR a utilizar en tareas de clasificación.

Las principales contribuciones de APIS respecto a otros sistemas propuestos en la bibliografía se describen a continuación.

### Múltiples configuraciones para generar la señal de referencia

APIS puede utilizar múltiples canales transmitidos por un iluminador de oportunidad (multicanal biestático), diferentes señales transmitidas por diferentes iluminadores (monocanal

multiestático) o la combinación de ambos (multicanal multiestático).

**Técnicas digitales de procesamiento en array**, las cuales proporcionan gran versatilidad al sistema, al permitir:

- La generación de múltiples haces para adquirir las señales de referencia y explorar el área de cobertura.
- La inclusión de nulos para rechazar señales de oportunidad interferentes en el/los canal/es de referencia y estas y el DPI en los canales de vigilancia.
- Implementar técnicas adaptativas de procesamiento espacial (SAP) para reducir clutter, jammers u otras interferencias.
- Estimar la dirección de llegada de los emisores de oportunidad disponibles.

En concreto, se han implementado dos arquitecturas, las cuales comparten las mismas cadenas receptoras y reciben las muestras digitalizadas de las señales adquiridas por cada uno de los elementos del array:

- Arquitectura 1: Utiliza técnicas de *beamforming* deterministas para la generación de el/los canal/es de referencia y SAP para los de vigilancia.
- Arquitectura 2: Utiliza técnicas de *beamforming* deterministas para la generación de los canales de referencia y vigilancia.

Ambas arquitecturas son equivalentes en entornos dominados por ruido, pero la primera presenta capacidades detectoras bastante superiores en entornos dominados por interferencias, a costa de una mayor carga computacional.

### Generación de imágenes ISAR

APIS incorpora nuevos algoritmos ISAR para la configuración multicanal

y multiestática con el fin de generar imágenes radar de los blancos detectados.

### El demostrador APIS

El objetivo último y más ambicioso del proyecto era la implementación de un demostrador como prueba de concepto/viabilidad tecnológica. Atendiendo al objetivo de detectar y generar imágenes ISAR de aviones volando a baja cota, se definió el escenario radar presentado en la figura 4: operaciones de aterrizaje y despegue en el aeropuerto de Barajas (Madrid).

El diseño del demostrador respetó los requisitos generales de APIS: sistema abierto (fácilmente adaptable e integrable en redes de sensores) y modular (facilidad de mantenimiento y reparación, capacidad de crecimiento inherente).

Sus características finales son las que se resumen a continuación (figuras 4 y 5):

- Iluminador de oportunidad: Torrespaña. Señal TDT multicanal (múltiple de 3 canales).
- Geometría: bi-estático (1 TX 1 RX).
- Sistema de antenas: array lineal de dipolos planos responsable de la generación de los canales de vigilancia y una antena *yagi* para la adquisición de la señal de referencia.
- Receptor: COTS *Software-Based Radio boards*.
- Procesador: PC industrial, módulos software en C y Matlab, con ejecución off-line.

En la solución adoptada por el demostrador ha sido necesaria la utilización de una antena independiente para la adquisición del canal de referencia. La utilización del array para la



Fig. 4. De izda. a dcha.: escenario de pruebas definido para el demostrador APIS, emplazamiento del receptor radar (Paracuellos I), iluminador de oportunidad (Torrespaña).



Fig. 5. Antena del demostrador APIS diseñada y construida por Indra.

## en profundidad

generación de los canales de referencia y vigilancia requiere de conversores analógico/digitales con márgenes dinámicos muy elevados, capaces de adquirir la señal directa del emisor de oportunidad y los ecos débiles de los blancos. Estos requisitos no los cumplían las soluciones COTS propuestas para la implementación del demostrador y, dado que la utilización de una antena específica para el canal de vigilancia no introducía ninguna limitación a la demostración de las capacidades de detección y generación de imágenes ISAR pasivas utilizando las técnicas de procesado en *array*, se optó por esta solución.

El demostrador incorpora íntegramente las técnicas de procesado en *array* implementadas para las dos arquitecturas del sistema APIS. Aunque los algoritmos se han implementado en Matlab, se ha realizado un estudio de viabilidad sobre su potencial implementación en GPU (*Graphics Processing Unit*) concluyendo que es posible, debido al elevado grado de paralelización de los algoritmos.

### Análisis del demostrador en el escenario radar definido

A continuación se presentan, a modo de ejemplo, algunos de los resultados obtenidos al detectar y generar imágenes ISAR de aviones Airbus A320, A321 y A340 durante sus maniobras de aterrizaje en la senda sur del aeropuerto de Barajas (figura 6).

La duración de cada adquisición es de 20 s, de los cuales se procesan ventanas de 250ms separadas 500ms. Cada ventana de procesado se denomina PRI (*Pulse Repetition Interval*).

En la figura 7 se muestran las funciones de ambigüedad cruzada obtenidas tras la aplicación de las dos arquitecturas de procesado en *array* implementadas. El Airbus 321 se detecta con ambas arquitecturas, aunque las técnicas SAP que incorpora la arquitectura 1 reducen significativamente el nivel de fondo. La ventaja asociada es más evidente a la hora de detectar el Airbus 320 (más pequeño), pues este avión no se detecta con la arquitectura 2 pero sí con la arquitectura 1. Como valor añadido, manifiesto la capacidad de detectar vehículos circulando en las autovías próximas al aeropuerto de Barajas.

El resultado de superponer las salidas generadas por el detector CACFAR (*Cell Averaging – Constant False Alarm Rate*) para los 40 PRI procesados de los 20 segundos de datos adquiridos se presenta en la figura 8, para la arquitectura 1 y el Airbus 321.

En la figura 10 se muestran ejemplos de imágenes ISAR generadas para un Airbus A320, un Airbus A321 y un Airbus de la familia A340. Se observa cómo es posible una estimación de las dimensiones de las aeronaves, si bien deben tenerse en cuenta una serie de factores que dificultan la interpretación de estas imágenes. Aunque se llaman imágenes, no deben interpretarse como imágenes ópticas, sino como el resultado de la energía retrodispersada por un objeto al ser iluminado por una onda electromagnética de una determinada frecuencia.

La consideración anterior es aplicable a sistemas radar monoestáticos, pero en el caso del radar biestático, la geometría del problema dificulta la interpretación de la imagen utilizando únicamente indicadores geométricos. Se requiere de un estudio profundo que permita identificar las características a extraer de las imágenes generadas con el objetivo de desarrollar clasificadores, a partir de bases de datos reales. El demostrador APIS es un elemento clave para la generación de estas bases de datos.

Airbus	A320	A321	A340
Longitud	37m	44m	63-75m
Envergadura	34m	34m	60-63m

Fig. 6. Dimensiones de los tres aviones detectados durante su maniobra de aterrizaje en el aeropuerto de Barajas

### El radar pasivo en aplicaciones de seguridad y defensa

A continuación se enumeran algunas de las aplicaciones en las que un radar pasivo como APIS podría ser de relevante utilidad:

#### Aplicaciones terrestres

Vigilancia perimetral de infraestructuras estratégicas: refinerías, centrales nucleares, edificios gubernamentales, etc.

Control de accesos no autorizados en áreas restringidas abiertas: zonas de difícil cobertura.

Control de fronteras: zonas de difícil cobertura, complemento de radares activos con posibilidad de clasificación de blancos mediante ISAR.

Radar de baja probabilidad de interceptación (LPI) en entornos militares para clasificación de blancos basada en imágenes.

#### Aplicaciones marítimas

Supervisión del tráfico portuario mediante señales UMTS o LTE (*Long Term Evolution*). El radar pasivo se presenta como una solución eficiente frente a los radares activos (contaminación electromagnética), con

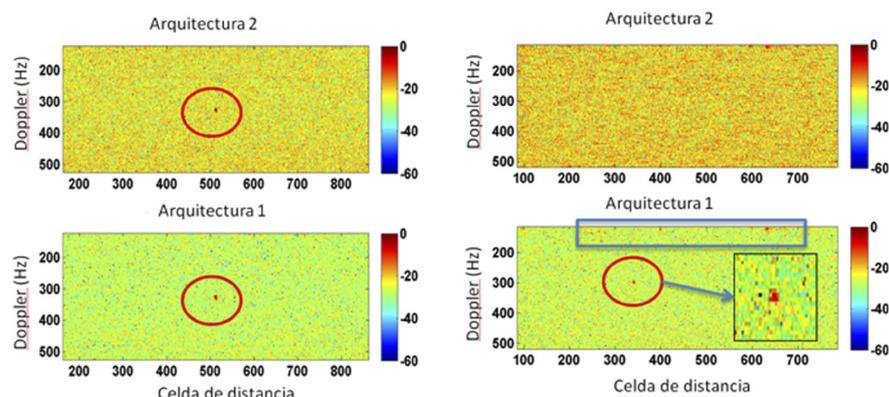


Fig. 7. Funciones de ambigüedad cruzada obtenidas de las arquitecturas 1 (SAP) y 2: Airbus 321 (izda), Airbus 320 (dcha).

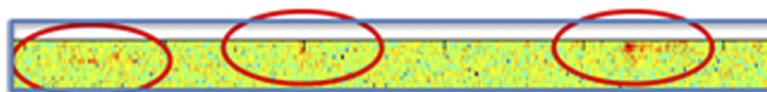


Fig. 8. Detalle de la función de ambigüedad cruzada mostrada en la figura 7 para el Airbus 320 y la Arquitectura 1.

posibilidad de clasificación de blancos mediante ISAR para identificación de situaciones de riesgo, control de embarcaciones de diferente se ha marcado un rectángulo azul en la zona situada en las proximidades del doppler nulo (blancos estacionarios o con velocidades bajas). Un zoom de esta zona se muestra en la figura 8, donde se pone de esloro y tonelaje en vías de navegación compartidas y vigilancia de mercancías peligrosas, contaminantes, etc., en aproximación o tránsito.

Vigilancia costera en zonas de orografía compleja (cabos, rías, islotes, etc.), zonas de difícil cobertura, como complemento de radares activos con posibilidad de clasificación de blancos mediante ISAR.

**Aplicaciones aéreas**

Apoyo a control de tráfico aéreo: complemento de radares activos en zonas de difícil cobertura (valles, coberturas a baja cota), GAP FILLER.

Aplicación en plataformas embarcadas (helicópteros y UAV por su reducido peso y versatilidad de posición): zona de cobertura adaptativa en función del O (iluminador de oportunidad) y trayectoria de la plataforma.

**Otras aplicaciones**

Pronóstico meteorológico local. Control de velocidad de vehículos en zonas de alta densidad de tráfico.

Protección de estaciones de seguimiento de misiones espaciales.

**Conclusiones**

El proyecto APIS (*Array Passive ISAR adaptive processing*) se ha desarrollado en el marco del Programa JIP ICET de inversión conjunta en I+T de Defensa de la EDA sobre “conceptos innovadores y tecnologías emergentes”, del que el Ministerio de Defensa de

España es miembro contribuyente. El consorcio APIS ha estado constituido por seis entidades de cuatro países, en el que la empresa INDRA ha sido líder, y que ha contado también con la participación de la Universidad de Alcalá por parte de España.

La característica principal de APIS, y que constituye su contribución al diseño y desarrollo de radares pasivos en aplicaciones de seguridad y defensa, es la integración en una única plataforma del concepto de radar pasivo, la utilización de técnicas de procesado en *array* y técnicas de procesado espacial adaptativas y la posibilidad de generar imágenes ISAR (*Inverse Synthetic Aperture Radar*) de los blancos detectados con propósitos de clasificación. En concreto, APIS es el primer sistema pasivo capaz de generar imágenes ISAR.

Como valor añadido, el proyecto ha culminado con el diseño, desarrollo y validación en un entorno real de un demostrador como prueba de concepto/viabilidad tecnológica. El caso de estudio definido para el test fue la detección y generación de imágenes ISAR de aviones volando a baja cota, durante las maniobras de aterrizaje y despegue en el aeropuerto de Barajas (Madrid).

Los resultados han demostrado que un radar pasivo que incorpora técnicas de procesado en *array* puede aplicarse en las siguientes tareas:

- Detección y seguimiento de blancos aéreos en escenarios urbanos complejos. Más aún, las pruebas de validación de l demostrador han probado la viabilidad de utilizar el sistema para la detección de blancos terrestres.
- Generación de imágenes ISAR con propósitos de clasificación.

La disponibilidad del demostrador APIS es una pieza clave en el desarrollo de nuevas versiones, debido a la posibilidad que brinda de generar bases de datos de imágenes ISAR de blancos con el objetivo de diseñar estrategias de clasificación, así como bases de datos de *clutter* biestático a frecuencias de sistemas de comunicaciones, cuya caracterización estadística permitirá la mejora de las etapas de detección en entornos especialmente complicados y hostiles.

**Referencias**

[1]. IEEE Standard Radar Definitions. IEEE Aerospace and Electronic Systems Society Sponsored by the Radar Systems Panel (2008). *IEEE Std 686-2008*.

[2]. Howland, P. E. (2005). FM radio based bistatic radar. Radar Sonar and Navigation, *IEE Proceedings*, vol. 152, n3, pp. 107-115.

[3]. Malanowski, M. K. (2008). PaRa-De Passive Radar Demonstrator family development at Warsaw University of Technology. *MRRS-2008 Sym*, pp.22-24.

[4]. Griffiths, H. L. (1986). Television-based bistatic radar. Communications, Radar, and Signal Processing, *IEE Proceedings F*, vol. 133, no. 7, pp 649-657.

[5]. Coleman, C. W. (2008). A practical bistatic passive radar system for use with DAB and DRM illuminators. *Radar Conference 2008, IEEE RADAR'08*, pp. 1-6.

[6]. Zemhari, R. N. (2009). GSM passive radar for medium range surveillance. *EuRAD2009, European Radar Conference*, pp.49-52.

[7]. Petri, D. C. (2009). Ambiguity function study for UMTS Passive Radar. *EuRAD 2009, European Radar Conference*.

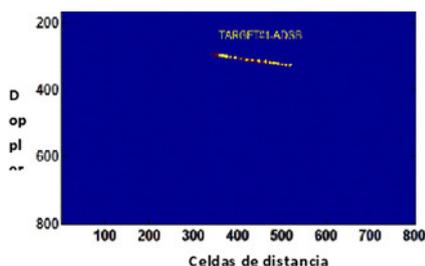


Fig. 9. Detecciones generadas por el CA-CFAR para los 40 PRI procesados en la secuencia de 20 s adquirida durante el aterrizaje del Airbus 321. Para evaluar la calidad de las detecciones aparecen superpuestos los datos proporcionados por un receptor ADSB.

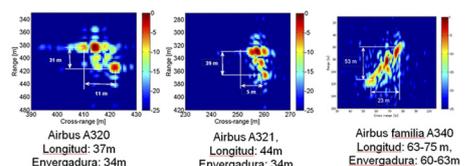


Fig. 10. Imágenes ISAR generadas para un Airbus 320 (izda.), 321 (centro) y 341 (dcha.). Se indican las dimensiones estimadas y las reales.